

На правах рукописи

Волковский Артем Александрович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ
ШЕРОХОВАТОСТИ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА НА
ОСНОВЕ ВЫБОРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И РАЦИОНАЛЬНЫХ
РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ**

Специальность

2.5.6 - Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Пермь 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Научный
руководитель:**

Макаров Владимир Федорович
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Янюшкин Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Чувашский государственный университет имени
И.Н. Ульянова» кафедра «Технология
машиностроения», профессор

Носенко Владимир Андреевич
доктор технических наук, профессор, Волжский
политехнический институт, филиал ФГБОУ ВО
«Волгоградский государственный технический
университет», кафедра «Технология и оборудования
машиностроительных производств», заведующий
кафедрой

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет имени И.И. Ползунова» (АлтГТУ),
г. Барнаул

Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д.ПНИПУ.05.18 при Пермском национальном
исследовательском политехническом университете по адресу: 614990, г.Пермь,
Комсомольский проспект д.29.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
(<http://pstu.ru/diss/>)

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. ПНИПУ.05.18
доктор технических наук, профессор

Нихамкин
Михаил
Шмерович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В настоящее время традиционные материалы подвергаются замене на полимерные композиционные материалы, что является одним из направлений развития машиностроения. Сбалансированность физико-механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет повысить энерго-силовые характеристики технологических машин.

Активное внедрение композиционных материалов отмечено в изделиях и узлах аэрокосмической техники, автомобилестроения, судостроения и прочих областях машиностроения. В качестве примеров отдельных элементов конструкции могут выступать такие, как корпуса судов, фюзеляжи самолетов, корпусные детали гоночных болидов и т.д. Конструкторская документация на каждую единицу номенклатуры вышеуказанных изделий включает в себе высокие требования к обеспечению качества обработанной поверхности. Однако ввиду анизотропии свойств, абразивного воздействия, низкой теплопроводности и прочих нехарактерных для металлов и сплавов свойств традиционные методы механической обработки не позволяют обеспечить требования к точности и качеству обработанной поверхности изделия.

Наиболее явным несоответствием качества обработанных деталей из ПКМ выступает дефектообразование при обработке лезвийным инструментом. Основными дефектами являются такие, как деламинация, термодеструкция полимерного связующего, ворсистость и трещинообразование в матрице композита. Для устранения этих дефектов применяются различные методы ручной слесарной механической обработки. Кроме того, наличие дефектов в виде вырывов армирующих волокон и трещин в матрице композита может являться причиной снижения несущей способности конструкции, а также способности сопротивления усталости при знакопеременных нагрузках.

В связи с этим для решения проблемы обеспечения требуемого качества поверхностного слоя при механической обработке изделий из ПКМ предлагается применение последовательной лезвийно-абразивной обработки. При лезвийной обработке в зоне контакта режущего инструмента и заготовки, армирующие волокна не перерезаются, а накапливаются на режущей кромке инструмента и подвергаются упругой деформации сжатия, после чего, при достижении критической величины давления инструмента, вытягиваются и разрушаются с образованием деламинации краевых слоев композита и трещин в связующей матрице. Данный процесс носит циклический характер на протяжении всего периода резания. Поэтому возникает необходимость устранения вышеуказанных дефектов, что может быть достигнуто при обеспечении хрупкого разрушения волокнистого наполнителя. Последнее является следствием применения высоких

скоростей резания, а также острой режущей кромки, обладающей высокой твердостью. Таким образом, обеспечение требований шероховатости обработанной поверхности, точности, расположения и формы поверхностей достижимо при последующей абразивной обработке, в результате которой устраняется дефектный слой.

Степень разработанности темы. Диссертационная работа дополняет результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса механической обработки полимерных композиционных материалов изложенных в трудах В.М. Ярославцева, В.Ф. Макарова, М.А. Тамаркина, Ю.М. Зубарева, Э.Э. Тищенко, Н.В.Козулько, В.А.Носенко, А.В. Приёмшева, С.В.Гайтс, А.М. Маркова, А.Е. Раскутина, А.С. Янюшкина, Д.В.Лобанова и многих других, и является развитием исследований в области технологического обеспечения качества обработанной поверхности при механической обработке полимерных композиционных материалов.

Цель работы – технологическое обеспечение требуемой шероховатости и предотвращение дефектов при механической обработке изделий из углепластика на основе выбора режущего инструмента и рациональных режимов резания.

Для достижения указанной цели необходимо решить комплекс следующих задач:

1. Провести анализ проблем образования дефектов при лезвийной механической обработке ПКМ из углепластика и путей их устранения.

2. Провести обоснование разработки и применения технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки.

3. Разработать методику проведения экспериментальных исследований качества поверхностного слоя в зависимости от режимов резания и режущего инструмента при последовательной лезвийной и абразивной обработке ПКМ. А также методики исследования несущей способности конструктивно-подобных образцов из углепластика путем испытаний на растяжение и разрыв.

4. Провести экспериментальные исследования влияния режимов резания и режущего инструмента при последовательной лезвийно-абразивной обработке на шероховатость поверхностного слоя. Провести сравнительные исследования несущей способности КПО путем проведения испытания на растяжение и разрыв ПКМ, прошедших лезвийную и лезвийно-абразивную обработку.

5. На основе анализа результатов экспериментальных исследований получить математическую модель, устанавливающую зависимость шероховатости поверхностного слоя от режимов механической обработки лезвийным и абразивным инструментом. В результате сравнительного исследования несущей способности КПО, прошедших лезвийную и последовательную лезвийно-абразивную обработку, определить эффективность нового метода обработки.

Разработать технологические рекомендации и алгоритм действий инженера-технолога механического цеха при технологической подготовке производства деталей из полимерных композиционных материалов на основе углеволокна.

Объектом исследования является механическая обработка лезвийным и абразивным инструментом полимерных композиционных материалов на основе углеволокна.

Предмет исследования – технологическое обеспечение требуемой шероховатости и предотвращения дефектов при механической обработке изделий из углепластика.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые на основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что разрушение поверхности при лезвийной обработке конструктивно-подобных образцов (КПО) из углепластика носит циклический характер.

2. Впервые доказано, что применение высокой скорости резания, твердости и острой режущей кромки позволяет предотвратить образование дефектов поверхностного слоя и снизить шероховатость при финишной обработке КПО из углепластика.

3. Получены эмпирические математические модели, устанавливающие влияние режимов последовательной лезвийно-абразивной обработки на шероховатость поверхностного слоя и позволяющие определить рациональные режимы резания.

4. Обнаружено, что применение последовательной лезвийно-абразивной обработки обеспечивает повышение несущей способности КПО в пределах 20 % вследствие предотвращения дефектов и повышения качества поверхностного слоя в сравнении с лезвийной обработкой.

Методы исследования. Теоретическая база исследований построена на основах технологии машиностроения, теории резания материалов, математической статистики и методологии научного исследования. Обработка статистических данных и построение зависимостей выполнялись при помощи такого программного обеспечения, как Microsoft Excel. Измерения экспериментальных исследований проводились с помощью современных средств. Планирование эксперимента реализовано согласно методике планирования полного факторного эксперимента. Исследования шероховатости обработанной поверхности сопровождалось применением профилометра Mahr PS-1. Измерение микрорельефа производилось с помощью оптического двойного микроскопа теневой интерференции МИС-11. Измерения сил резания и виброускорений технической системы выполнялись на диагностическом стенде Камертон «РОС». Исследование механизма стружкообразования при лезвийной обработке ПКМ и проведение сравнительных испытаний несущей способности выполнялись на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5965.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании новой технологии механической обработки ПКМ, включающей в себя последовательное применение лезвийной и абразивной обработки, обеспечивающей требуемую шероховатость, предотвращение дефектного слоя и повышение несущей способности КПО.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по выбору режущего инструмента и назначению рациональных режимов резания лезвийным и абразивным инструментом, обеспечивающим повышение качества поверхностного слоя и несущей способности изделий из углепластика.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическое и экспериментальное обоснование цикличности механизма формирования стружки и появления дефектов поверхностного слоя в виде деламинации краевых слоев, ворсистости и образования трещин в матрице композита при лезвийной обработке ПКМ из углепластика, вызванного упругими деформациями компонентов композита.

2. Практическое обоснование эффективности применения абразивной обработки шлифовальным кругом путем изменения механизма резания за счет обеспечения высокой скорости резания, высокой твердости и остроты режущей кромки с целью сохранения стабильного перерезания армирующий волокон углепластика.

3. Результаты многофакторного эксперимента исследования последовательной лезвийно-абразивной полимерных композиционных материалов.

4. Математическая модель влияния режимов лезвийной и абразивной обработки на шероховатость обработанной поверхности ПКМ.

5. Повышение несущей способности КПО до 20% при применении последовательной лезвийно-абразивной обработки в связи с ликвидацией дефектов и повышения качества поверхностного слоя относительно лезвийной обработки.

6. Алгоритм выбора технологически рационального решения при проектировании технологического процесса механической обработки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту специальности 2.5.6 Технология машиностроения: 2 – технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие ходы, обеспечивающие повышения качества изделий и снижение их себестоимости; 4 – совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска; 7 – технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационного исследования доложены на Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение» (г.Уфа 07-09 апреля 2021г.), на Международной научно-технической конференции «ПРОМ-Инжиниринг» (г.Сочи 17-21 мая 2021г.), на Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы» (г.Ростов-на-дону 26-29 мая 2021г.), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием ИТММ-21(г.Пермь 27 сентября – 1 октября 2021г.), на Всероссийской научно-практической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии инновации -2021) АКТТИ-21 (18-20 ноября 2021г.), на Всероссийской

научно-технической конференции с международным участием отв. редактор Р.Г. Гришин «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара 24-25 ноября 2021г), на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием отв. редактор Р.Г. Гришин (г. Самара 10-11 ноября 2022 г.), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в машиностроении и материаловедении ИТММ-22» (г. Пермь 10-14 октября 2022г) и Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Машиностроительные технологические системы METS-22» (г. Ростов-на-Дону 26-29 2022г/)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ в научных изданиях, в том числе 4 работы, в изданиях рекомендованных ВАК и 2 работы в международных базах цитирования, входящих в Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы, приложения. Основная часть работы изложена на 148 страницах, содержит 87 рисунков, 26 таблиц. Список литературы включает 104 источника, в том числе 34 зарубежных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы, цель и задачи исследования.

В первой главе проведен анализ научно-технических работ ученых при лезвийной и абразивной обработке, связанных с процессом стружкообразования при лезвийной обработке ПКМ, методов механической обработки и показателей качества обработанной поверхности, присущих каждому методу.

Основными технологическими операциями механической обработки изделий из полимерных композиционных материалов является лезвийная обработка методами сверления и фрезерования. В большинстве работ указывается, что при резании ПКМ лезвийным инструментом возникает образование дефектов, таких как деламинация крайних слоев заготовки, термодеструкция полимерного связующего, трещинообразование в матрице композита и ворсистость обработанной поверхности (Рисунок 1). Поисками методов устранения дефектов занимались такие ученые как В.М. Ярославцев, В.Ф. Макаров, А.С. Янюшкина, Д.В. Лобанова, В.А. Носенко, Маркова М.А. Тамаркин, Ю.М. Зубарев, А.В. Приёмшев, С.В. Гайтс, А.Е. Раскутин, Сересо-Mejias F, Aiman Akmal Abdul Nasir, El-Nofy M и многие другие.

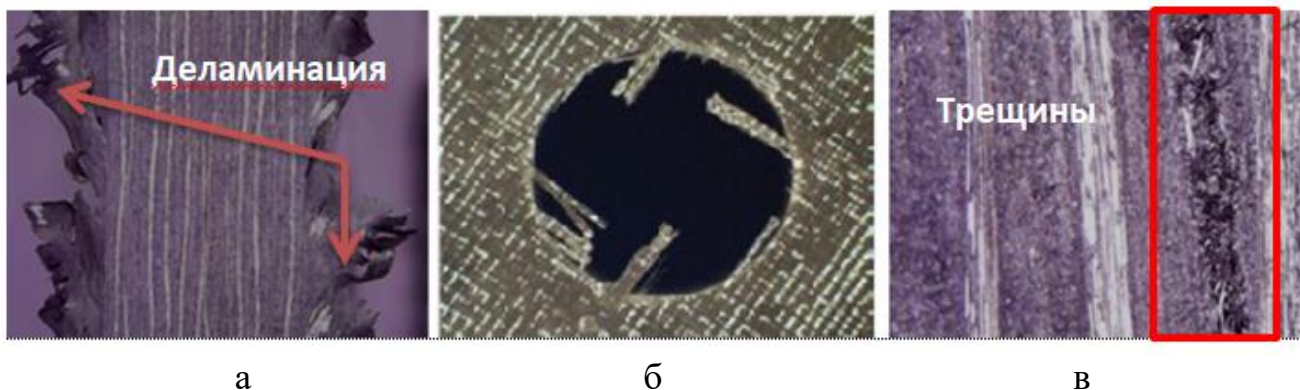


Рисунок 1 – Виды дефектов механической обработки ПКМ: а- деламинация при фрезерной обработке(10х); б – термодеструкция и ворсистость поверхности при операциях сверления(10х); в – трещинообразование в матрице при фрезерной обработке(40х)

Основными направлениями развития исследований по обрабатываемости ПКМ являются рационализация геометрии режущего инструмента, представленного в виде специальных фрез-роутеров, а так же подбор режимов резания, где в качестве основных рекомендаций выступает скорость резания от 170м/мин до 200м/мин.

По результатам анализа, наиболее высокие показатели качества обработанной поверхности представлены при высокоскоростной обработке, гидроабразивном резании и абразивной обработкой с применением инструмента с высокой твердостью и острой режущей кромкой. Однако, полного устранения дефектов не обеспечивает ни один из методов, формируя деламинацию краевых слоев и деламинацию выходной кромки при гидроабразивном резании. Абразивная обработка, в свою очередь, представленная в работах Тамаркина М.А. Тищенко Э.Э и др. с использованием гибкого лепесткового круга, что исключает возможность регулирования глубины резания и, как следствие, производительности производственного процесса.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава представляет собой обоснование возможности применения последовательного процесса лезвийно-абразивной обработки с целью устранения дефектов.

Выдвинута гипотеза: При действии лезвийного режущего инструмента на заготовку в материале возникают упругие деформации матрицы и армирующих волокон. При движении инструмента вдоль пути резания, происходит накопление армирующих волокон на режущей кромке, их вытягивание и разрыв с хрупким разрушением матрицы.

Проведенные предварительные экспериментальные исследования процесса образования стружки показали ярко выраженный циклический характер увеличения силы резания и виброускорений технической системы. Каждый из циклов может быть разбит на этапы увеличения упругих деформаций волокон,

характеризующий рост сил резания до максимального значения и зону хрупкого разрушения (Рисунок 2).

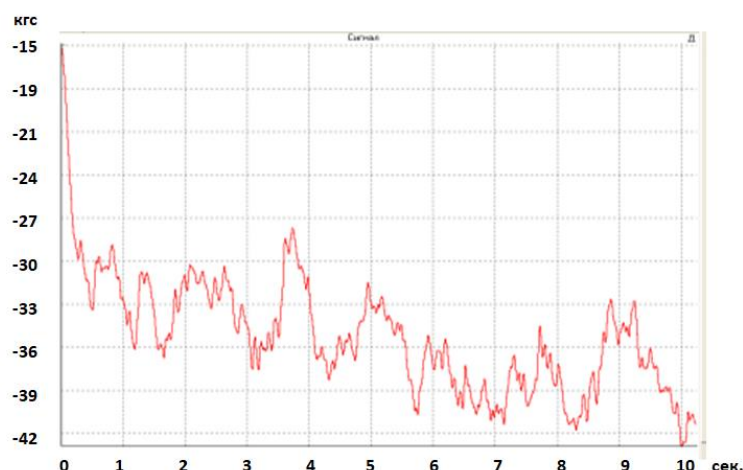


Рисунок 2 – Динамика изменения составляющей P_z силы резания при ортогональном резании ПКМ

Вследствие вытягивания волокон из матрицы композита, на обработанной поверхности возникают такие дефекты как ворсистость, трещинообразование и деламация краевых слоев (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Схема стружкообразования при ортогональной лезвийной обработке ПКМ: а – упругое деформирование армирующих волокон; б – обработанная поверхность углепластика

Для повышения качества необходимо изменить механизм стружкообразования, обеспечивающий высокую скорость, острую режущую кромку инструмента с высокой твердостью. На основе анализа работ различных ученых наиболее приемлемой является абразивная обработка. Она сопровождается применением твердых материалов, с острой режущей кромкой при высокой скорости резания. Таким образом, твердое абразивное зерно, движущееся с высокой скоростью, ввиду сопоставимости своих размеров с размерами армирующих волокон, позволяет обеспечить хрупкое разрушение составляющих композиционного материала без образования дефектов поверхностного слоя (рисунок 4).

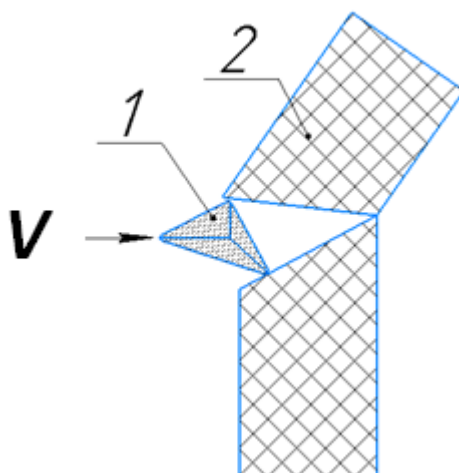


Рисунок 4 – Схема хрупкого разрушения армирующего волокна: 1- абразивное зерно; 2 – армирующее волокно

Это утверждение необходимо проверить путем проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе представлена методика проведения экспериментальных исследований влияния режимов последовательной лезвийно-абразивной обработки полимерных композиционных материалов на основе углеволокна и режущего инструмента на качество поверхностного слоя и несущую способность конструктивно-подобных образцов из ПКМ.

Для проведения экспериментальных исследований последовательной лезвийно-абразивной обработки в качестве заготовки приняты плоские образцы углепластика размерами 70x50x5мм.

Для испытаний несущей способности изготовлены прямые плоские образцы тип 3 ГОСТ 11262-2017 с накладками под места крепления прихватов размерами 250x25x5мм (рисунок 5).

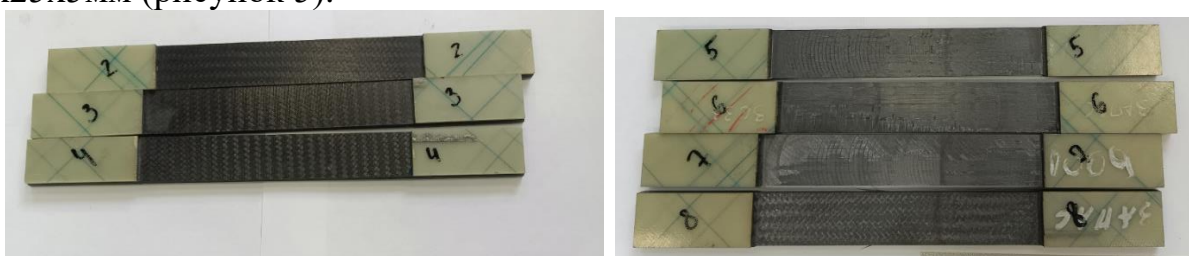


Рисунок 5 – Образцы для испытаний на растяжение и разрыв: 1-4 – последовательная лезвийно-абразивная обработка; 5-8 – лезвийная обработка фрезерованием

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях Пермского национально исследовательского политехнического университета. Для проведения исследований применялся универсально-фрезерный станок *JET 1452TS DRO*, а для исследования абразивной обработки применялся плоскошлифовальный станок *JET JPSG 1224AH*.

Для физического моделирования процесса струкообразования при лезвийной обработке и проведения испытаний несущей способности КПО использовалась универсально электромеханическая машина *Instron* (рисунок 6).

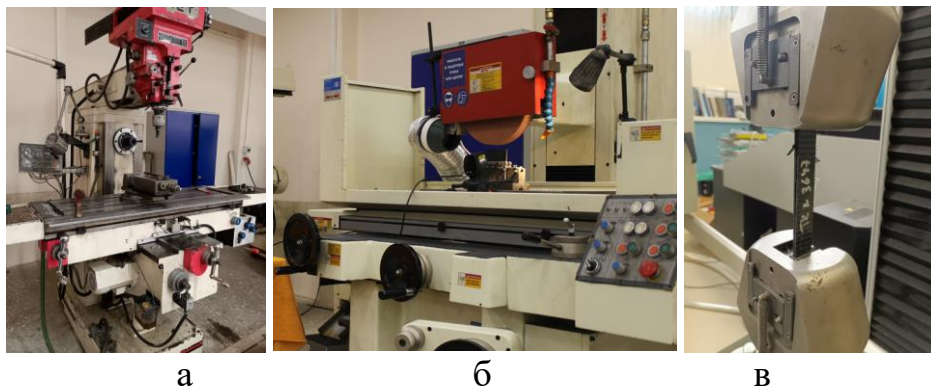


Рисунок 6 – Общий вид экспериментальной установки: а – универсально-фрезерный станок *JET 1452 TS DRO*; б – плоскошлифовальный станок *JET JPSG 1224AH*; в – универсальная электро-механическая машина *instron 5965*

В качестве режущего инструмента для лезвийной обработки приняты специально применяемые фрезы роутеры *Sandvik Coromant SA* и *Sandvik Coromant PreCorp*. Выбор марок и характеристик шлифовальных кругов произведен на основании производственного применения и распространения в каждой из областей машиностроительной отрасли. В качестве абразивного инструмента выбраны шлифовальными кругами из электрокорунда нормального *14A*, электрокорунда белого *25A*, карбида кремния зеленого *64C* и эльбора *1A1-100/80 K5 V25*. Основные характеристики шлифовальных кругов представлены зернистостью *F46*, *F60* и *F80*, пористостью *7-14*, а так же средней твердостью (рисунок 7).

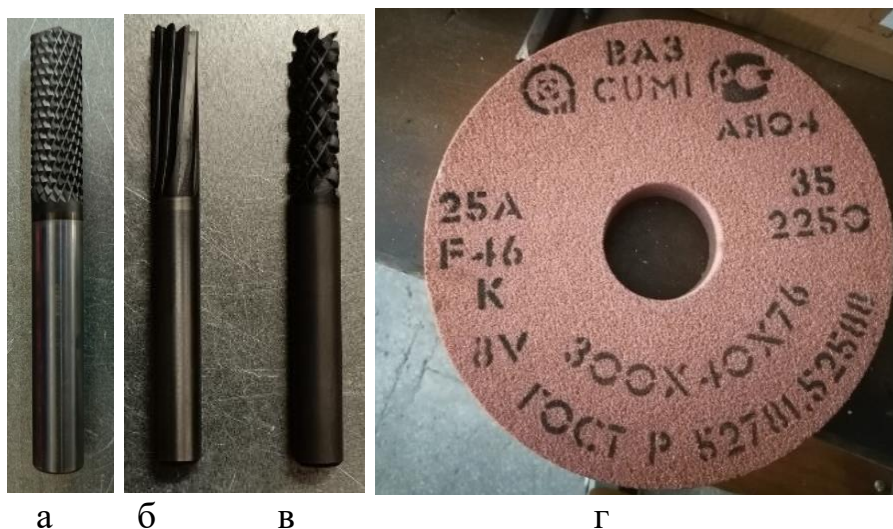


Рисунок 7 – Режущий инструмент: а - фреза *Sandvik Coromant SA-DCSH-D-1200 C207*; б – фреза *Sandvik Coromant PRECORP SER#59339*; в – фреза *Sandvik Coromant PRECORP SER#57357*; г – шлифовальный круг *25AF46G14V35 2250*

Для измерения шероховатости поверхностного слоя применен профилометр *Mahr MarSurf PS-1*. Для оценки дефектов в виде трещин и деламинации краевых

слоев заготовки применен электронный цифровой микроскоп *BM 200 LCD*. Измерение температуры резания выполнялось при помощи пирометра *Bosh Universal Tem*.

В качестве основных исследуемых параметров были приняты такие показатели как наличие и величина дефектного слоя, выраженного в виде деламинации, термодеструкции, трещинах в матрице и прочих. Так же, в качестве параметра применена шероховатость поверхностного слоя *Ra мкм*.

Определения функциональных зависимостей величины шероховатости поверхностного слоя от режимов последовательной лезвийно-абразивной обработки проводилось методом планирования полного факторного эксперимента. В качестве независимых переменных для лезвийно обработки принимались такие факторы как частота вращения шпинделя в диапазоне $n=260-2240$ об/мин, продольная подача стола $S=65-135$ мм/мин и глубина резания $t=1-3$ мм. В качестве независимых переменных при абразивной обработке приняты зернистость шлифовального круга в диапазоне $F=46-80$, продольная скорость подачи стола $S=5-10$ м/мин и глубина шлифования на один ход стола $t=0.05=0.25$ мм.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов резания и режущих инструментов при последовательной лезвийно-абразивной обработке на шероховатость поверхностного слоя, дефектообразование и показатели несущей способности конструктивно-подобных образцов.

В результате сравнительного анализа шероховатости обработанной поверхности каждым из видов лезвийного режущего инструмента определено, что более высокое качество обеспечивается путем применения фрезы *Sandvik Coromant PreCorp Ser#59339* (рисунок 8).



Рисунок 8 – Механическая обработка лезвийным и абразивным инструментом

Для данного инструмента согласно методике планирования многофакторного эксперимента и регрессионного анализа получена математическая модель влияния режимов фрезерования на шероховатость поверхностного слоя. Осуществлена проверка однородности дисперсии по критерию Кохрена, оценка важности коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента и адекватности

математической модели согласно критерию Фишера. Получена эмпирическая математическая модель зависимости шероховатости поверхностного слоя от режимов резания лезвийным инструментом:

$$Ra = \frac{0.066S^{0,57}t^{0,167}}{n^{0,04507}} \quad (1)$$

В результате анализа установлено, что при увеличении глубины резания и подачи шероховатость поверхностного слоя увеличивается, однако повышение частоты вращения шпинделя имеет обратную тенденцию.

При механической обработке лезвийным инструментом обнаружены дефекты поверхностного слоя, которые необходимо устранить. Разработаны рекомендации по режимам резания при фрезеровании углепластика ВКУ с целью обеспечения шероховатости поверхностного слоя $Ra=0.5-0.9\text{мкм}$. Рациональными режимами лезвийной обработки приняты частота вращения шпинделя $n=2600-4000\text{об/мин}$, скорость продольной подачи стола $S=135-180\text{ мм/мин}$ и глубина резания $t=6-8\text{ мм}$, что обеспечивает требования конструкторской документации $Ra=1.25-2.5\text{мкм}$.

После предварительного фрезерования на рациональных режимах резания выполнена абразивная обработка путем применения многофакторного планирования эксперимента. Наиболее высокие показатели качества поверхностного слоя получены при обработке шлифовальным кругом из электрокорунда белого с размеров зерна $400-315\text{мкм}$, высокой пористости на керамической связке $25A\ F46\ G14\ V35\ 2250$. В результате обработки данных полного факторного эксперимента получена эмпирическая математическая модель зависимости шероховатости поверхностного слоя от характеристик шлифовальных кругов и режимов плоского шлифования.

$$Ra = 0.00415F^{1.0567}t^{0.1075}S^{0.383} \quad (2)$$

Анализ математической модели показал, что с увеличением зернистости F , глубины шлифования на один ход стола t и продольной подачи стола S . Минимальные значения шероховатости поверхностного слоя достигаются при зернистости шлифовального круга $F46$, скорости подачи стола $S=5\text{м/мин}$, глубине резания $t=0.15\text{мм}$ и равняются $Ra=0.264\text{мкм}$

На основании результатов сравнительных испытаний образцов подготовленных традиционной лезвийной и последовательно лезвийно-абразивной обработкой определена повышенная нагрузочная способность и удлинение заготовки до разрушения (рисунок 9).

Образцы с 1 по 8

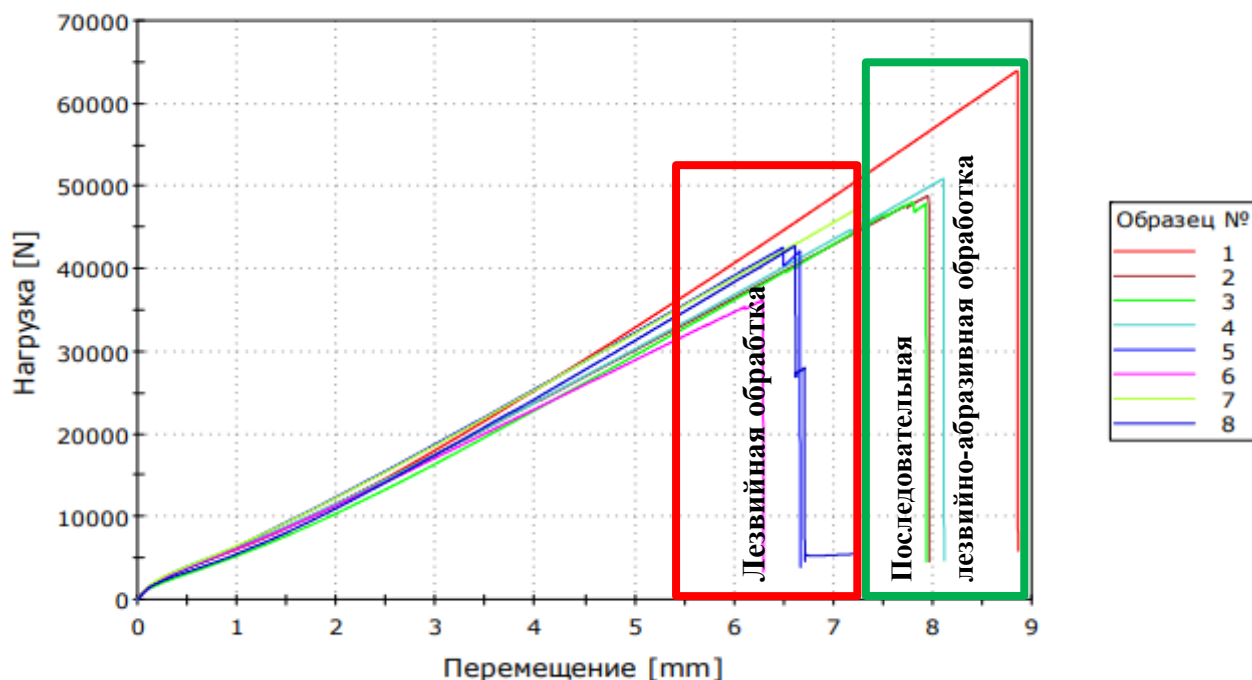


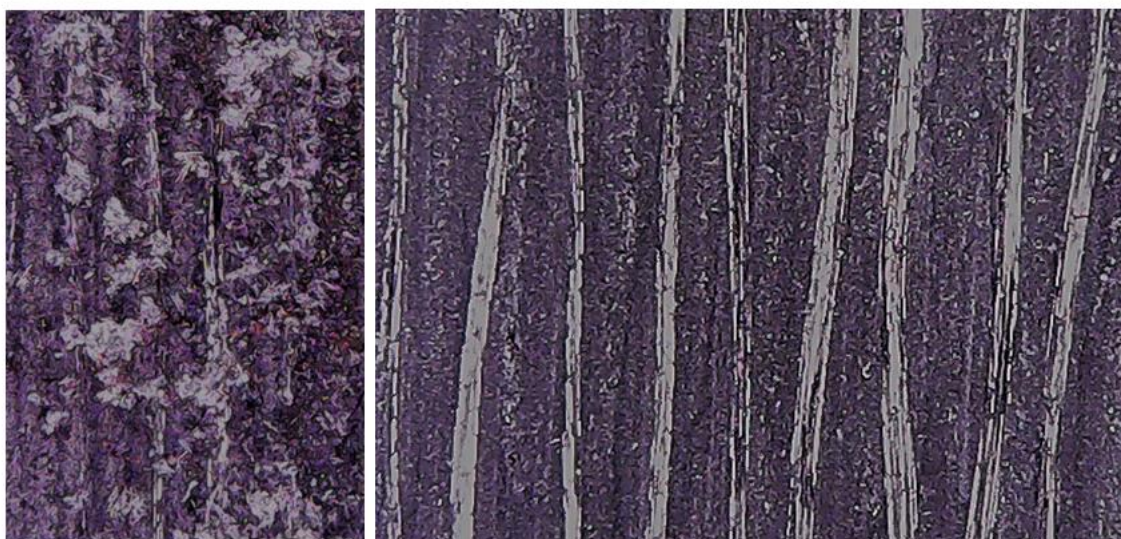
Рисунок 9 - График испытаний несущей способности образцов из ПКМ изготовленных лезвийной и лезвийно-абразивной обработкой

Анализ результатов исследования показал, что применение последовательной лезвийно-абразивной обработки приводит к повышению несущей способности КПО за счет снижения величины дефектного слоя путем применения последовательной лезвийно-абразивной обработки.

Таблица – Сводные результаты испытаний на растяжение и разрыв

Последовательная лезвийно-абразивная обработка			Лезвийная обработка		
№ образца	Усилия растяжения кН	Перемещение до разрыва мм	№ образца	Усилия растяжения кН	Перемещение до разрыва мм
1	64 кН	8,84 мм	5	42кН	6,65 мм
2	49 кН	7,95 мм	6	36кН	6,28 мм
3	48 кН	7,92 мм	7	48кН	7,32 мм
4	50 кН	8,1 мм	8	42кН	6,61 мм
Средние показатели	52,75кН	8,2025 мм	Средние показатели	42кН	6,715 мм

Определено повышение несущей способности изделий из углепластика на основе испытаний на растяжение и разрыв в результате применения метода последовательной лезвийно-абразивной обработки за счет снижения величины дефектов на обработанной поверхности и обеспечения шероховатости поверхности $Ra=0.264\text{мкм}$ (рисунок 10).



а

б

Рисунок 10 – Поверхностный слой: а- лезвийная обработка; б – последовательная лезвийно абразивная обработка

Механическая обработка полимерных композиционных материалов из углепластика при использовании лезвийного инструмента сопровождается образованием дефектов поверхностного слоя (рис.11), однако применение технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки позволяет обеспечить снижение величины дефектов полученных на этапе предварительной лезвийной обработки.

В результате экспериментальных исследований выявлено, что применение последовательной лезвийно-абразивной обработки позволяет обеспечить снижение шероховатости поверхностного слоя до $Ra=0.264\text{мкм}$. Экспериментально доказано повышение несущей способности КПО из углепластика путем проведения испытаний на растяжение и разрыв до 20% относительно образцов подготовленных традиционными лезвийными методами формообразования.

Далее представлены технологические рекомендации и алгоритм разработки технологического процесса механической обработки изделий из углепластика на основе выбора рационального режущего инструмента и режимов обработки при последовательной лезвийно-абразивной обработке ПКМ (рисунок 11).

Рекомендованные режимы предварительной лезвийной обработки фрезерованием являются скорость продольной подачи $S=135-180\text{мм/мин}$, частота вращения шпинделя $n=260-400\text{об/мин}$ и глубина резания $t=6-8\text{мм}$, что позволяет обеспечить шероховатость поверхностного слоя $Ra=1.25-2.5\text{мкм}$.

Рекомендованные режимы абразивной обработки плоским шлифованием являются скорость продольной подачи стола $S=1-5\text{мм/мин}$, глубина шлифования на один ход стола $t=0.02-0.05\text{мм}$ и зернистость шлифовального круга $F46$, что позволяют исключить дефектный слой полученный в результате лезвийной обработки.

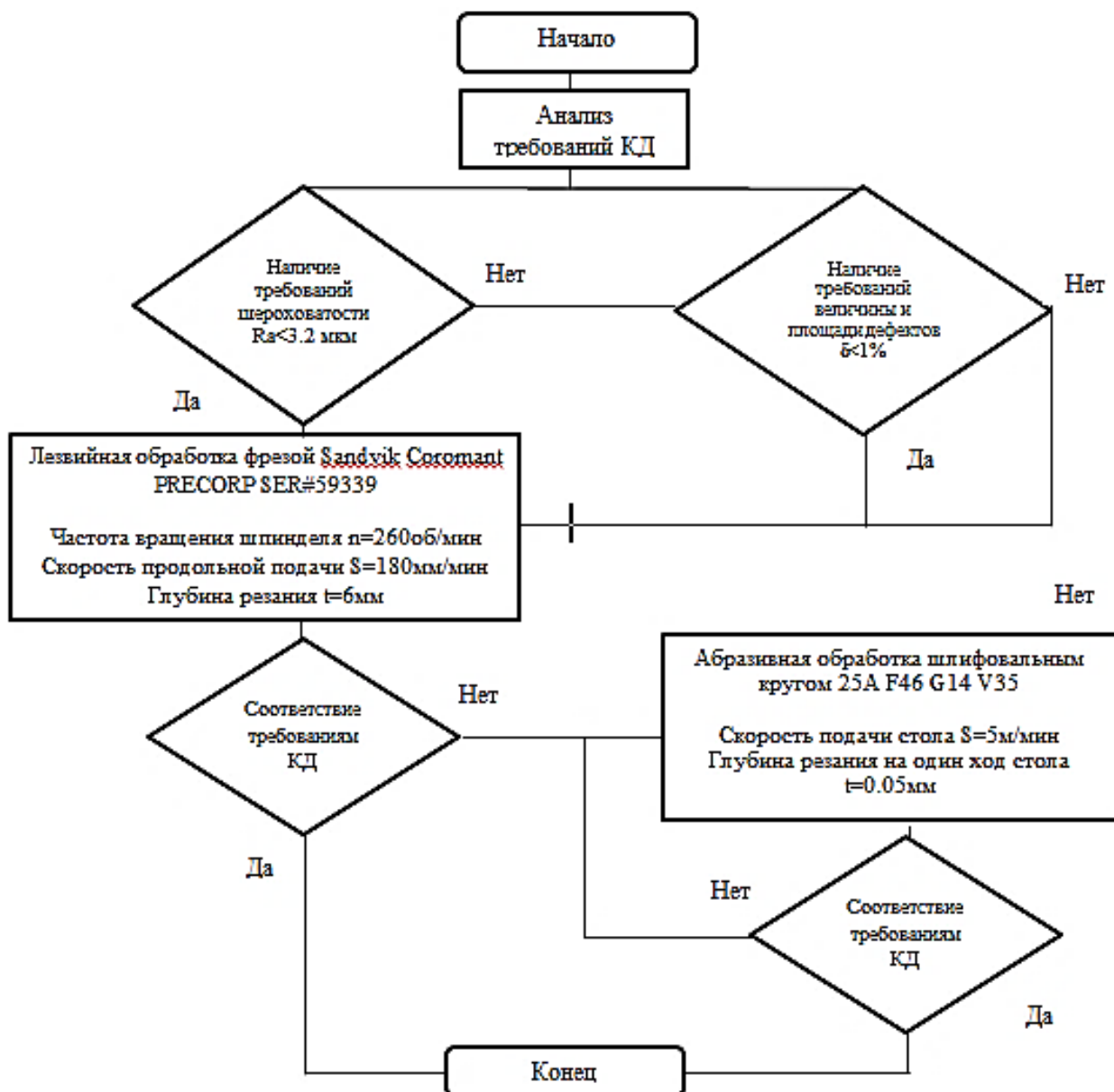


Рисунок 11 - Алгоритм действий инженера технолога участка механической обработки

Технологические рекомендации переданы для внедрения на предприятие ООО «Лысьвенский инструментально-механический завод».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена научная задача технологического обеспечения требуемой шероховатости и предотвращения дефектов при механической обработке изделий из углепластика на основе выбора режущего инструмента и рациональных режимов резания при последовательной лезвийно-абразивной обработке. В результате реализации методики последовательной лезвийно-абразивной обработки обеспечено повышение несущей способности КПО из углепластика в диапазоне 10-20% относительно традиционной лезвийной обработки.

1. На основании моделирования процесса стружкообразования выполнено обоснование применения новой технологии последовательной

лезвийно-абразивной обработки ПКМ обеспечивающей повышение качества поверхностного слоя и ликвидацию дефектов при механической обработке ПКМ путем увеличения скорости резания, твердости и остроты режущей кромки.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по влиянию режимов резания и режущего инструмента на шероховатость поверхностного слоя. Так же разработана методика проведения сравнительного исследования несущей способности КПО из углепластика при лезвийной и последовательной лезвийно-абразивной обработке.

3. Проведены экспериментальные исследования и разработаны эмпирические математические модели влияния режимов резания при лезвийной и абразивной обработке ПКМ на шероховатость поверхностного слоя. Установлено, что в качестве лезвийного режущего инструмента позволяющего обеспечить наилучшие показатели шероховатости поверхностного слоя равные $Ra=1,25\text{мкм}$ рекомендуется прямозубая твердосплавная концевая фреза при рациональных режимах обработки $n=260-400\text{об/мин}$, $S=135-180\text{мм/мин}$ и глубине резания $t=6-8\text{мм}$. Предотвращение дефектов при механической обработке и обеспечение требуемой шероховатости достигается путем применения шлифовальных кругов из электрокорунда белого марки $25A\ F46\ G14\ V35\ 2250$. Рациональными режимами абразивной обработки выступают: глубина резания на один ход стола $t=0-0,05\text{мм}$ и скорость подачи стола $S=0-5\text{м/мин}$ при скорости резания $V=25-35\text{ м/с}$ шероховатость поверхностного слоя $Ra=0,264\text{мкм}$.

4. Проведены экспериментальные исследования несущей способности конструктивно-подобных образцов обработанных лезвийной и последовательной лезвийно-абразивной обработкой. Получено повышение несущей способности при последовательной лезвийно-абразивной обработке на 20%.

5. Разработаны технологические рекомендации и алгоритм действий инженера-технолога механического цеха при технологической подготовке производства. Материалы исследований переданы для внедрения на предприятия ООО «Лысьвенский инструментально-механический завод».

6. Результаты исследования используются в учебном процессе Пермского национального исследовательского политехнического университета при обучении бакалавров и магистров по направлению подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в изданиях ВАК РФ:

1. Макаров В. Ф., Песин М. В., Волковский А. А. Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов // Научно-технические исследования в машиностроении. 2023. №. 9. С. 27-38. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-27-38> (дата обращения: 02.10.2023).

2. Волковский А.А., Макаров В.Ф. Оценка качества обработанной поверхности при плоском шлифовании ПКМ // Вестник ПНИПУ.

Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 73–82. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.08

3. Волковский А. А., Макаров В. Ф. Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. №. 2. С. 15-25. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-2-15-25> (дата обращения: 28.06.2023)

4. Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И. Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 9. – С. 40–48.

Статьи, опубликованные в изданиях индексируемых в базе Scopus:

1. Volkovskii A.A., Makarov V.F. The study of grinding polymer composite material/ A.A. Volkovskiy, V.F. Makarov// Proceeding of the 7th international conference on industrial engineering (ICIE 2021): Springer Intern. Publ., – (Lecture Notes in Mechanical Engineering.- 2022.- Vol.2.- pp.548-555.

2. Volkovskiy A, Makarov V. Chip formation processes based on orthogonal processing of polymer composite material/ A. Volkovskiy, V Makarov// "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021-Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres". - Vol. 2131(4). - 2021

Статьи, опубликованные в других изданиях:

1. Волковский А.А., Макаров В.Ф., Проблемы обеспечения качества поверхностного слоя полимерных композиционных материалов при абразивной обработке жесткими шлифовальными кругами / А.А.Волковский, В.Ф.Макаров – Текст: электронный // Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России» [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: <https://ugatu.ru/elektronnyie-izdaniya/>

2. Волковский А.А., Макаров В.Ф., Песин М.В., Исследование абразивной обработки композиционных материалов жесткими шлифовальными кругами/ А.А.Волковский, В.Ф.Макаров, М.В. Песин.,. – Текст: электронный // Инновационные технологии в машиностроении материаловедении– 2021: материалы XXII Всероссийской научно-практической конференции (27.09-01.10. 2021 г.) / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь: ПНИПУ, 2021.

3. Волковский А.А., Макаров В.Ф., Комаров М.Э. Процесс стружкообразования при лезвийной и абразивной обработке полимерных композиционных материалов / А.А.Волковский, В.Ф.Макаров. М.Э. Комаров – Текст: электронный // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVIII Всероссийской научнотехнической конференции / Отв. ред. Р.Г. Гришин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2021. – 300 с.

4. Волковский А.А., Макаров В.Ф., Песин М.В., Комаров М.Э. Сравнительные исследования процесса формообразования поверхностей при лезвийной и абразивной обработке полимерных композиционных материалов / А.А.Волковский, В.Ф.Макаров, М.В. Песин., М.Э.Комаров. – Текст: электронный // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2021: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции (18-20 ноября 2021 г.) / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Т. 2. – Пермь: ПНИПУ, 2021.

5. Волковский А.А. Технологическое обеспечение качества обработанной поверхности при плоском шлифовании ПКМ / А.А.Волковский. – Текст: электронный // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий : сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей / под редакцией В.А. Лебедева ; Донской государственный технический университет. – Текст : электронный. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2022. – 342 с. – URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2022436>. – ЭБС ДГТУ. – Загл. с экрана.

6. Волковский А.А. Макаров В.Ф. Влияние режимов обработки при плоском шлифовании на основе углеволокна на температуру в поверхностных слоях обработки / А.А.Волковский, В.Ф.макаров. – Текст: электронный // Инновационные технологии в машиностроении материаловедении– 2021: материалы XXII Всероссийской научно-практической конференции (10-14 октября 2022.) / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь: ПНИПУ, 2022.

7. Волковский А.А., Макаров В.Ф., Применение прерывистого шлифования как операции финишной обработки жеталей из полимерных композиционных материалов / А.А.Волковский, В.Ф.Макаров. М.Э. Комаров – Текст: электронный // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVIII Всероссийской научнотехнической конференции / Отв. ред. Р.Г. Гришин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – 164 с.